

文章编号: 2095-4980(2020)05-0946-05

Q波段双通道幅度控制多功能芯片

刘会东, 丁红沙, 魏洪涛

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 设计了一款 Q 波段的双通道多功能单片电路, 其内部集成了威尔金森功分器、六位 0.5 dB 步进数控衰减器和单刀双掷开关。在设计过程中, 开关单元电路采用三级并联结构, 有效降低电路插入损耗, 提高隔离度; 数控衰减器单元采用多节并联 T 型结构, 改善高频段插入损耗和衰减精确度指标。通过以上设计方法, 该单片电路在 40~50 GHz 插入损耗为 10 dB, 隔离度为 26 dB; 能够实现幅度控制步进 0.5 dB, 最大衰减量 31.5 dB。

关键词: Q 波段; 双通道; 多功能; 衰减器; 砷化镓

中图分类号: TN136

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019111

A Q-band dual-channel monolithic circuit with amplitude control functions

LIU Huidong, DING Hongsha, WEI Hongtao

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: A novel dual-channel monolithic circuit working at Q-band is reported which integrates the functions of Wilkinson power divider, digital attenuator and Single Pole Double Throw (SPDT) switch. Three-level parallel structure is adopted in the SPDT switch unit during the design process which can reduce insertion loss and improve isolation effectively. A kind of multi-section parallel-T structure is used in the digital attenuator unit for improving insertion loss and attenuation accuracy in high frequency band. By means of the above design, a monolithic circuit with 10 dB insertion loss and 26 dB isolation is produced successfully, which has the amplitude control function of 0.5 dB step to achieve 31.5 dB maximum attenuation.

Keywords: Q-band; dual-channel; multi-function; attenuator; GaAs

微波毫米波单片集成电路广泛用于测量、通信、雷达等系统中。数控衰减器、开关与威尔金森功率分配器是微波毫米波系统中经常用到的单片集成电路。数控衰减器通过给予不同的电压实现有效控制信号幅度^[1]; 开关通过给予 0~5 V 的互补电压在不同的信道之间实现切换^[2]; 威尔金森功率分配器具有宽频带和等相位的特性^[3], 能够将一路输入信号能量分成 2 路或多路。数控衰减器方面, 文献[4]设计了一款 DC~18 GHz 6 位 0.5 dB 步进数控衰减器芯片, 文献[5]设计了一款 25~30 GHz 6 位 0.5 dB 步进数控衰减器芯片, 但都只给出仿真结果; 开关方面, 文献[6]设计了一款 DC~40 GHz、采用三级并联结构的单刀单掷开关; 文献[7]设计了一款 42 GHz、采用两级并联结构的单刀双掷开关。

本文在砷化镓高电子迁移率晶体管工艺上成功开发出一款新颖的工作在 Q 波段的宽带多功能单片电路。该多功能单片电路把威尔金森功分器、6 位 0.5 dB 步进数控衰减器、单刀双掷开关这 3 种单功能电路集成在一个芯片上。与单功能单片电路相比, 多功能单片电路中各个功能单元在芯片内部通过半导体工艺加工进行连接, 减少了键合压点数目, 降低了芯片装配难度及占用组件的空间^[8], 有效降低组件的体积和成本。

1 总体设计

本文研制的多功能单片电路原理框图如图 1 所示, 微波信号进入多功能单片电路的 COM 端口, 通过威尔金

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-12-15

作者简介: 刘会东(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波单片电路设计。email:31309215@qq.com

森功分器分为 2 组信号，经过开关、衰减器后，上支路信号通过 RF₁ 端口发射出去，下支路信号通过 RF₂ 端口发射出去，上下 2 个支路为对称结构。以通道 1(RF₁-COM)为例，当开关切换到端口 1 时，RF₁-COM 处于导通状态，通过调整衰减器可以控制微波信号的幅度；当开关切换到端口 2 时，RF₁-COM 处于隔离状态，此时微波信号无法通过。

2 电路设计

2.1 威尔金森功分器设计

图 2 为威尔金森功分器电路原理图^[9]。L₁,L₄ 和 L₅ 是特征阻抗为 50 Ω 的微波传输线；L₂ 和 L₃ 为 λ/4 波长、特征阻抗为 50√2 ≈ 70.7 Ω^[10]的微波传输线；R 为隔离电阻。图 3 为功分器电路的仿真曲线，在 40~50 GHz 频带范围内，RF₁-COM, RF₂-COM 的插入损耗小于 3.5 dB，RF₁-RF₂ 的隔离度大于 18 dB，COM 端口电压驻波比小于 1.4:1，RF₁-RF₂ 端口电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)小于 1.2:1。

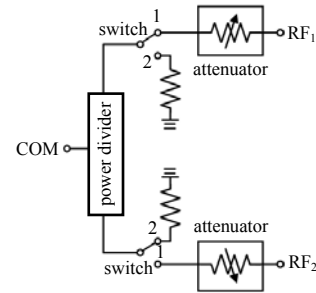


Fig.1 Schematic of multi-functional circuit
图 1 多功能单片电路原理框图

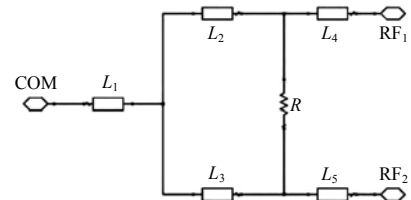


Fig.2 Schematic of Wilkinson power divider circuit
图 2 威尔金森功分器电路原理图

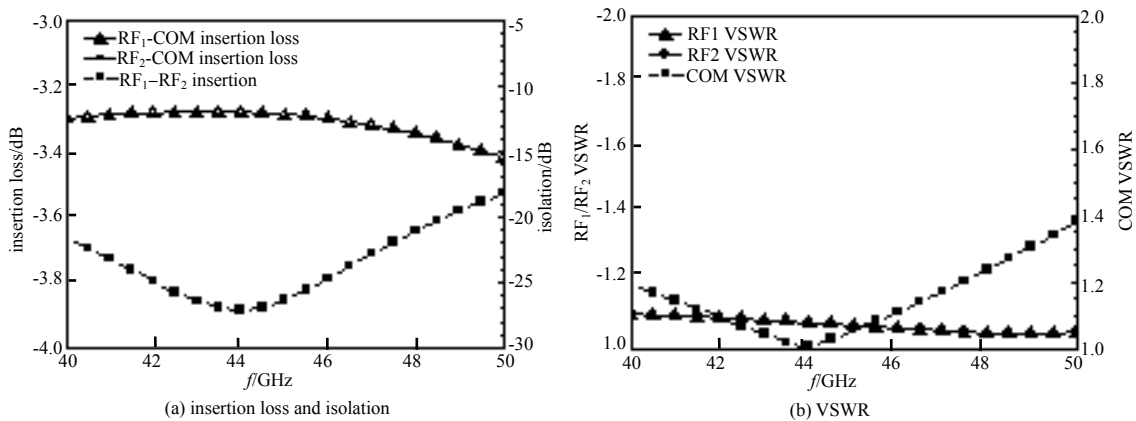


Fig.3 Simulation curves of Wilkinson power divider circuit
图 3 威尔金森功分器仿真曲线

2.2 单刀双掷开关设计

单刀双掷开关通常有 2 种结构：串联结构和并联结构。串联结构为开关器件串联在电路里，当开关器件处于导通状态时，开关电路打开；当开关器件处于关断状态时，开关电路断开。并联结构为开关器件并联在电路里，当开关器件处于导通状态时，开关电路断开；当开关器件处于关断状态时，开关电路打开。综合考虑开关插入损耗、隔离度和电压驻波比指标，本文单刀双掷开关电路采用 3 个开关器件，其尺寸分别为 1×20 μm,1×70 μm 和 1×90 μm，经过仿真得到 3 种器件在 40 GHz,45 GHz,50 GHz 频点的串联插入损耗和并联插入损耗，如表 1 所示。

表 1 开关器件插入损耗

Table1 Insertion loss of switch device

size of switch device/μm	frequency/GHz	series insertion loss/dB	parallel insertion loss/dB
1×20	40	4.15	0.04
	45	4.15	0.05
	50	4.15	0.05
1×70	40	1.39	0.19
	45	1.39	0.20
	50	1.39	0.21
1×90	40	1.11	0.27
	45	1.11	0.28
	50	1.11	0.30

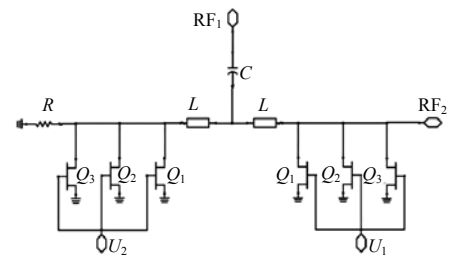


Fig.4 Schematic of SPDT switch circuit
图 4 开关电路原理图

由表 1 可以看出，在毫米波以上的频段，相比采用串联结构的开关，采用并联结构的开关具有更小的插入损耗^[11]，因此本文选用并联式单刀双掷开关结构。图 4 为开关电路原理图，C 为隔直电容，L 为 λ/4 波长微波传输

线^[12], R 为 $50\ \Omega$ 负载电阻; 电路采用三级开关器件并联结构, 有效增大了开关隔离度。当 $U_1=-5\text{ V}, U_2=0\text{ V}$ 时, RF_1-RF_2 处于导通状态; 当 $U_1=0\text{ V}, U_2=-5\text{ V}$ 时, RF_1-RF_2 处于隔离状态, 信号从另外一侧支路通过并被负载电阻 R 吸收。图 5 为开关仿真曲线, 在 $40\sim 50\text{ GHz}$ 频带范围内, RF_1-RF_2 插入损耗小于 1.6 dB , 隔离度大于 26 dB , RF_1 端口开态电压驻波比小于 $1.3:1$, RF_2 端口开态电压驻波比小于 $1.6:1$ 。

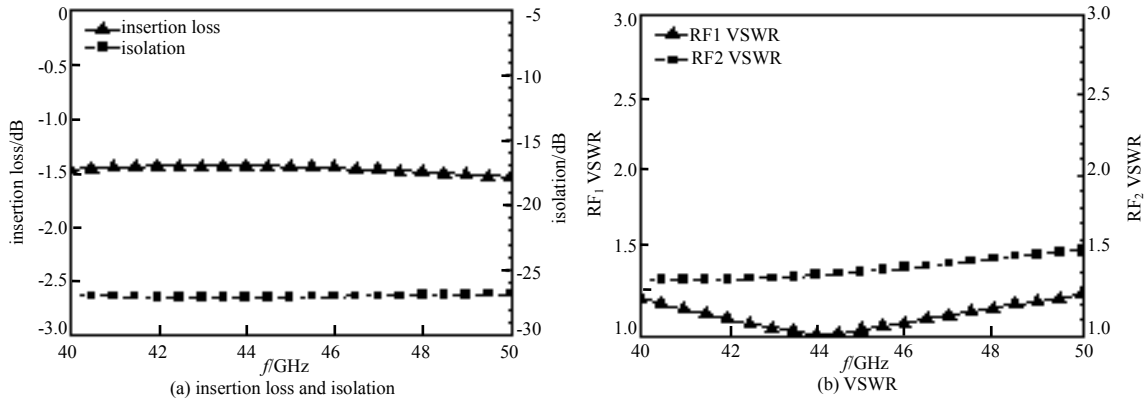


Fig.5 Simulation curves of SPDT switch circuit
图 5 开关仿真曲线

2.3 衰减器设计

衰减器常用结构有并联 T 型结构、T 型结构和 π 型结构, 见图 6^[13]。

T 型和 π 型结构常用于工作频带在 20 GHz 以内的数控衰减器^[14]; 由于 T 型和 π 型结构在毫米波以上频段插入损耗较大, 不适用于工作频带在 20 GHz 以上的数控衰减器。并联 T 型结构具有较小的插入损耗, 但难以实现较大的衰减量^[15], 为克服并联 T 型结构的缺点, 可以采用多节并联 T 型结构实现。

本文设计的 6 位数控衰减器中, 0.5 dB 位、 1 dB 位采用 1 节并联 T 型结构, 2 dB 位采用 2 节并联 T 型结构, 4 dB 位采用 3 节并联 T 型结构, 8 dB 位采用 5 节并联 T 型结构, 16 dB 位采用 10 节并联 T 型结构。图 7 为数控衰减器仿真曲线, 在 $40\sim 50\text{ GHz}$ 频带范围内, 插入损耗小于 3.0 dB , 电压驻波比小于 $1.8:1$ 。

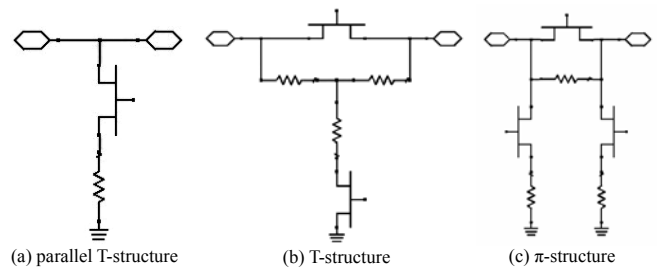


Fig.6 Topological structures of attenuator
图 6 衰减器拓扑结构

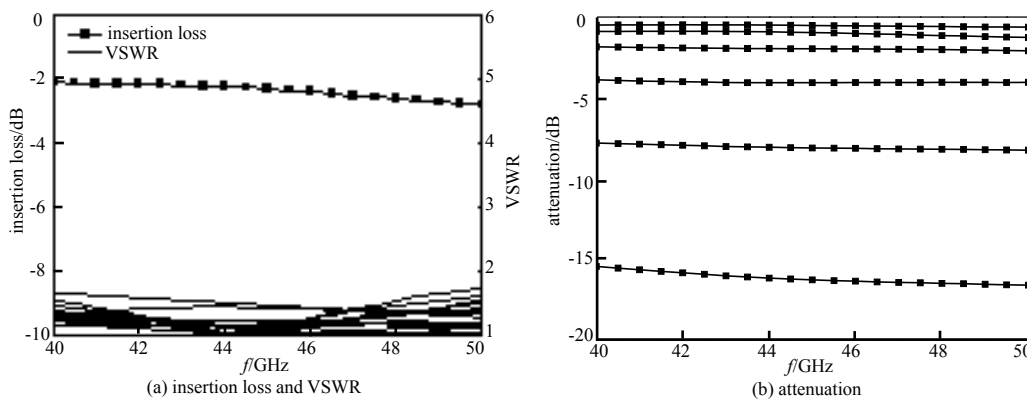


Fig.7 Simulation curves of attenuator
图 7 数控衰减器仿真曲线

2.4 多功能电路设计

由于所设计的多功能单片电路工作在 Q 波段, 在威尔金森功分器单元电路、数控衰减器单元电路和单刀双掷开关单元电路完成原理图设计后, 需对 3 种单元电路进行电磁场级联仿真, 检验每种单元电路的端口匹配及相邻微波传输线耦合对多功能电路性能的影响。图 8 为多功能电路电磁场仿真版图, 利用仿真软件平面电磁场仿真技术进行电磁场仿真, 根据仿真结果合理调整版图布局, 尽量减小微波传输线、各个微波元件之间的耦合度。

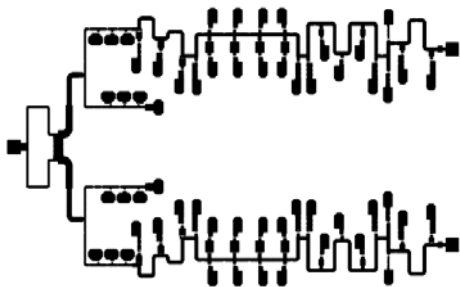


Fig.8 Layout of EM simulation of multi-functional circuit
图 8 多功能电路电磁场仿真版图

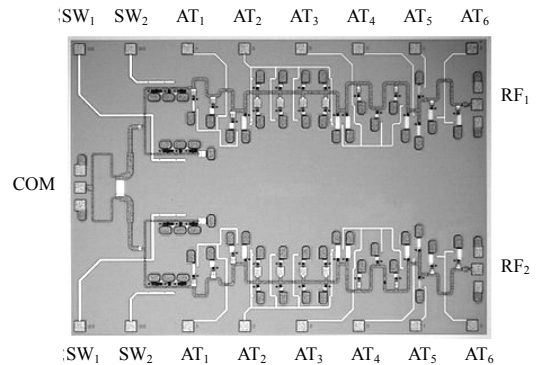


Fig.9 Photograph of multi-functional chip
图 9 多功能单片电路芯片照片

3 结果与分析

图 9 为本文研制的芯片实物照片，芯片面积为 $3.70\text{ mm} \times 2.65\text{ mm}$ 。COM, RF₁ 和 RF₂ 为微波端口，SW₁ 和 SW₂ 为开关控制端口，AT₁~AT₆ 为数控衰减器控制端口。表 2 为实现同样功能的 3 款单功能单片电路和本文所设计的多功能单片电路芯片尺寸对比，通过计算可见，采用多功能技术使芯片面积缩小了 16%。相比于单功能芯片，多功能芯片省去很多金丝键合线，节省了更多的组件空间。

表 2 芯片尺寸参数
Table2 Parameters of chip

	chip size	number of chip	chip area/ mm ²	total area/mm ²
power divider(NC6531C-4050)	1.60 mm×0.90 mm	1	1.44	11.71
switch(paper[11])	1.45 mm×1.00 mm	2	2.90	
attenuator NC13119C-4246)	3.35 mm×1.10 mm	2	7.37	
this paper	3.70 mm×2.65 mm	1	9.81	9.81

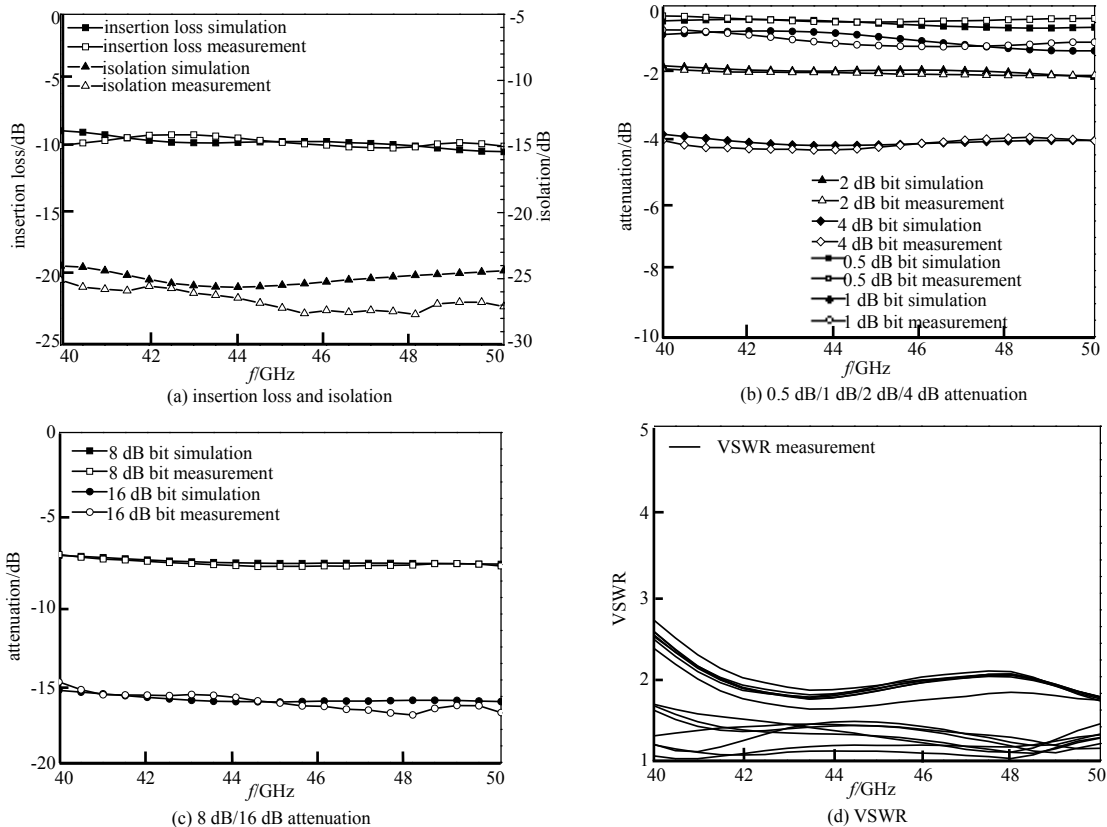


Fig.10 Comparison between simulation and measured curves of multi-function chip

图 10 多功能单片电路仿真和测试曲线

图 10 为多功能单片电路仿真和在片测试曲线。从测试曲线可以看出,在 40~50 GHz 范围内,插入损耗为 10 dB,隔离度为 26 dB,插入损耗的仿真曲线和实测曲线吻合度较好,隔离度实测曲线优于仿真曲线。从多功能单片电路基本衰减态仿真和测试曲线对比可以看出:0.5 dB,1 dB,2 dB,4 dB,8 dB,16 dB 基本衰减态在 40~50 GHz 范围内仿真曲线和测试曲线非常吻合,各基本衰减态均处于标称值附近,说明数控衰减器单元衰减量达到预期设计目标。多功能单片电路电压驻波比在 40 GHz 为 2.5:1,原因在于数控衰减器单元端口匹配电容尺寸较小,容易受工艺参数波动影响,导致仿真值和测试值产生偏差。

4 结论

本文设计的多功能单片电路具有集成度高、易于装配的特点,能够有效降低 T/R 组件的尺寸和成本。在设计过程中优选适合于 Q 波段的电路拓扑结构,使多功能电路的插入损耗、隔离度和衰减量指标达到预期目标;在选取端口匹配电容时,应充分考虑工艺容差对容值的影响,以改善整个电路的电压驻波比指标。

参考文献:

- [1] RADMANESH M M. Radio frequency and microwave electronics illustrated[M]. Beijing:Science Press, 2006.
- [2] 李富强,方园,高学邦,等. 毫米波单刀双掷开关的设计与制作[J]. 半导体技术, 2009,34(1):17-20. (LI Fuqiang,FANG Yuan,GAO Xuebang,et al. Design and fabrication of millimeter wave SPDT switch[J]. Semiconductor Technology, 2009,34(1):17-20.)
- [3] BAHL I,BHARTIA Prakash. Microwave solid state circuit design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [4] 谢媛媛,陈凤霞,高学邦. 一种超小型 DC-18 GHz MMIC 6 bit 数字衰减器[J]. 半导体技术, 2016,41(8):580-585. (XIE Yuanyuan,CHEN Fengxia,GAO Xuebang. A microminiature DC-18 GHz MMIC 6 bit digital attenuator[J]. Semiconductor Technology, 2016,41(8):580-585.)
- [5] 张博,赵晶,张晗,等. 高性能 25-30 GHz 6 位单片数控衰减器[J]. 西安邮电大学学报, 2016,21(2):63-67. (ZHANG Bo,ZHAO Jing,ZHANG Han,et al. A high performance 25-30 GHz 6 bit MMIC digital attenuator[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2016,21(2):63-67.)
- [6] 方园,李富强,高学邦,等. DC-40 GHz 反射型 GaAs MMIC SPST 开关[J]. 半导体技术, 2008,33(12):1115-1118. (FANG Yuan,LI Fuqiang,GAO Xuebang,et al. DC to 40 GHz reflective GaAs MMIC SPST switch[J]. Semiconductor Technology, 2008,33(12):1115-1118.)
- [7] CHAO Shih-Fong. 42 GHz MMIC SPDT bandpass filter-integrated switch using HEMT loaded coupled lines[J]. Electronics Letters, 2012,48(9):505-506.
- [8] 刘会东,刘文杰,高学邦,等. 具有数控衰减和放大功能的单片集成电路[J]. 半导体技术, 2014,39(7):501-505. (LIU Huidong,LIU Wenjie,GAO Xuebang,et al. A monolithic integrated circuit with digital attenuation and amplification functions[J]. Semiconductor Technology, 2014,39(7):501-505.)
- [9] ZHU Hongxu,CHEONG Pedro,TAM Kam-Weng. Analysis of isolation bandwidth of miniaturized Wilkinson power divider[C]// Global Symposium on Millimeter-Waves. Hong Kong,China:IEEE, 2017:55-57.
- [10] INDER Bahl,PRAKASH Bhartia. Microwave solid state circuit design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [11] KIM J H,KO W,KIM S H,et al. A high-performance 40-85 GHz MMIC SPDT switch using FET-integrated transmission line structure[J]. Electronics Letters, 2003,13(12):505-507.
- [12] BAHL I,BHARTIA P. Microwave solid state circuit design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [13] WU Hongjiang,GAO Xuebang. Chip technology for radar T/R module[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2017.
- [14] 刘志军,陈凤霞,高学邦,等. 2~12 GHz 集成 E/D 驱动功能的数控衰减器单片[J]. 半导体技术, 2013,38(4):254-258. (LIU Zhijun,CHEN Fengxia,GAO Xuebang,et al. 2-12 GHz MMIC digital attenuator with integrated E/D driver[J]. Semiconductor Technology, 2013,38(4):254-258.)
- [15] 张滨,李富强,杨柳,等. 带数字驱动的 Ku 波段 6 bit 数控衰减器设计[J]. 半导体技术, 2016,41(7):499-503. (ZHANG Bin,LI Fuqiang,YANG Liu,et al. Design of Ku-band 6 bit digital attenuator with digital driver[J]. Semiconductor Technology, 2016,41(7):499-503.)